那棱格勒河流域氢氧同位素特征及其指示意义

张寿川[1]， 赵春涛[2,3]， 安亚涛[4]， 刘 凯[1]， 余冬梅[2,3]，
陈 亮[2,3]， 李庆宽[2,3]， 王建萍[2,3]

（1. 中国地质科学院，北京 100037；2. 中国科学院青海盐湖研究所，青海省盐湖地质与环境重点实验室，青海 西宁 810008；3. 中国科学院青海盐湖研究所，盐湖资源综合高效利用重点实验室，青海 西宁 810008；4. 河北省煤田地质局第二地质队（河北省干热岩研究中心），河北 邢台 054001）

摘 要：本文基于那棱格勒河流域63组样品测试结果，分析流域内大气降水、河水、地下水、湖表卤水和晶间卤水的氢氧同位素和氘盈余参数分布特征及主控因素，结果表明：(1) 受到蒸发和水汽再循环的双重影响，研究区大气降水δD、δ[18]O均大于我国平均值，且研究区大气降水线斜率小于全球大气降水线但大于西北干旱区其他流域大气降水线，东亚季风远距离输送是导致研究区8月大气降水氘盈余偏低的主要因素。(2) 研究区河水线斜率小于全球大气降水线，河水氘盈余与δ[18]O、TDS呈负相关关系，均为河水经历强蒸发作用导致同位素分馏所致，研究区南部山区降雨是河水主要补给来源，高程效应导致不同区段河水δD、δ[18]O产生差异。(3) 不同区段地下水与地表水补给、排泄关系存在差异，加之地下水主要接受山区多源补给，导致地下水线斜率、截距均大于全球大气降水线和当地大气降水线。(4) 湖表卤水和晶间卤水均出现“氧漂移”现象，且二者氘盈余参数均小于0，这与蒸发导致氢氧同位素过度分馏密切相关，盐类矿物溶滤作用是致使晶间卤水氘盈余值小于湖表卤水的主要原因。

关键词：氢氧同位素；氘盈余；干旱区流域；那棱格勒河

水由氢、氧元素组成，氢原子和氧原子质量影响水分子的热力学性质[1]，导致水循环过程中产生同位素分馏效应，造成不同水体中氢氧同位素含量差异化[2-4]，因此，氢氧同位素常被应用于水文循环溯源研究[5]。除此之外，水文循环过程还受降雨、径流、入渗、蒸发、水汽凝结等过程影响[6-8]，这些水文循环过程均会在水体氢氧同位素上留下“指纹”印记，基于这些印记可以开展古气候重建[9]、揭示水汽再循环过程[10]、识别水体转换关系[11]、示踪植物水体循环等[12]。

昆仑山北坡地区气候受西北季风和亚洲季风环流叠加影响，降雨量小而蒸发量巨大，加之高海拔高寒和复杂的地形地貌，导致该区域呈现典型干旱区气候特征，水资源成为制约区域环境承载力和影响生态环境脆弱性的关键因素[13-15]。那棱格勒河（简称“那河”）位于昆仑山北坡、柴达木盆地南缘，是盆地内流域面积最大、水量最充沛的内陆河流[16]，也是山前冲洪积平原区地下水重要补给来源和植被涵养水源。那河流域尾闾盐湖卤水型关键矿产资源储量丰富[17]，针对成矿物质来源前人已开展那河流域及其尾闾盐湖锂成矿物源[18]、铷铯物源和富集过程[19]等方面的研究，但取得的认识仍然十分有限。水资源作为成矿物质迁移转化的重要载体，基于氢氧同位素识别那河流域不同水体补给来源和相互作用关系、示踪流域水文循环过程，可为成矿物质来源及其迁移转化规律研究奠定基础。

本研究在那河流域及其尾闾盐湖采集水体样品共计63组，开展氢氧同位素测试分析，结合区域地质构造和水文地质条件，识别不同水体氢氧同位素特征及影响因素，分析氘盈余参数及主控因素，

收稿日期：2024-08-20； **修订日期**：2024-09-14
基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2022QZKK0201）；青海省盐湖地质与环境重点实验室开放课题项目（2024-KFKT-B10）；中国地质科学院基本科研业务费（JKY202406）；国家自然科学基金（U20A2088）；盐湖资源综合开发与利用项目（2023ZXKYA05100）
作者简介：张寿川（1993-），男，博士，助理研究员，主要从事水文地球化学研究. E-mail: zhangsc@cags.ac.cn
通讯作者：赵春涛. E-mail: zhaoctao22@isl.ac.cn

揭示河流不同区段地下水、河水相互作用关系，示踪典型干旱区水文循环过程，对识别那河流域成矿物质来源和水资源可持续开发利用具有重要意义。

1 研究区概况

那河位于柴达木盆地南缘，由发源于昆仑山的洪水河和楚拉克阿拉干河汇流而成[20]，全长435 km，流域面积约为21900 km^2，是柴达木盆地内流域面积最大的内陆河，流经一级冲洪积扇和二级冲洪积扇后汇入柴达木盆地中部的一里坪盐湖、西台吉乃尔湖、鸭湖和东台吉乃尔湖(图1)。每年4—10月是那河的丰水期，该时段径流量约占全年径流量90%，年径流量约为8.73×10^8~20.1×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$，是盆地内径流量最大的河流。那河尾闾盐湖是我国储量最大的卤水型锂矿区，锂资源储量高达2.29×10^6 t[21]。

那河流域气候呈现典型的内陆高原高寒干旱特征，蒸发强烈、降水稀少。近40余年气象监测资料统计结果表明，气温多年平均值为2.6~4.3 ℃；降雨多年平均值约为30.0 mm，降雨年内分布极不均匀，每年5—9月降雨量约占全年降雨总量87%；蒸发量多年平均值约为1679 mm，蒸发量为降雨量的56倍。

1.1 地质概况

那河流域第四系地层分布广泛，主要包括下更新统冰水沉积物、中更新统冲洪积物、上更新统洪积物、全新统冲洪积物等[19]。下更新统冰水沉积物埋深较大，主要由含卵砂砾石构成，多呈次棱角状，

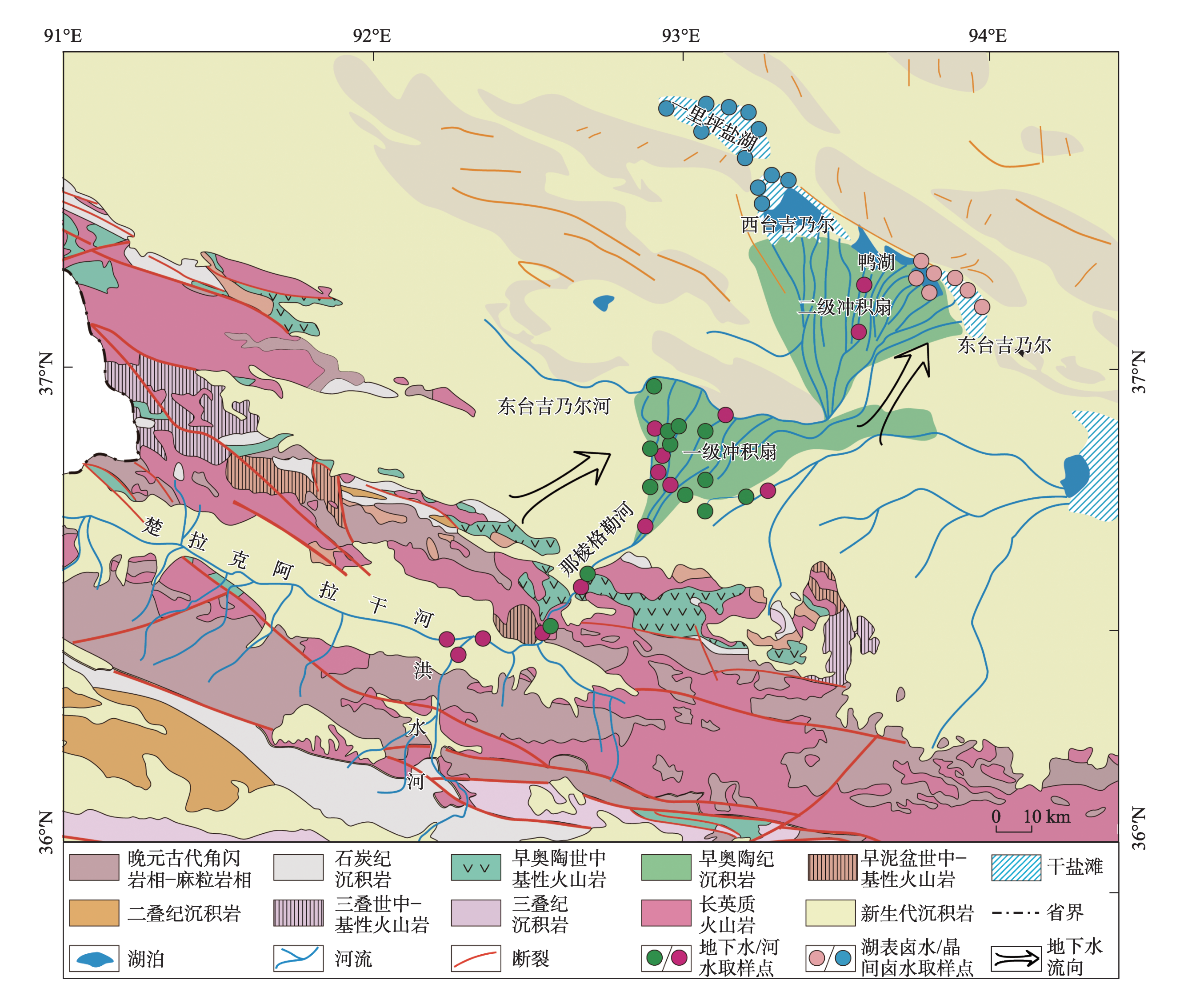


图1 那棱格勒河流域取样点分布

Fig. 1 The location of sampling site in the Nalenggele River

分选性较差;中更新统冲洪积物主要由含泥卵砾石构成,较为松散,磨圆程度较好;上更新统洪积物广泛出露于研究区地表,在洪积倾斜平原主要由砂卵砾石、含砾粗砂和含卵砾砂构成,含少量泥质,分选性差,在冲洪积平原主要由砂砾石和含砾砂层构成,砂层比例增加,砾石磨圆程度较好;全新统冲洪积物广泛分布于冲洪积平原区域,主要由含卵砂砾石、粉砂和亚黏土构成,部分砂层中含有腐蚀质,埋深较浅。

1.2 水文地质概况

基于地形地貌、水文地质条件和含水层水力性质等,可以将那河流域含水层系统划分为两类系统:第四系松散岩类孔隙潜水含水层系统和第四系松散岩类多层孔隙承压自流水含水层系统。这两类含水层系统的水文地质结构、含水层富水性以及水力性质特征等呈现显著的带状分布规律[18]。第四系松散岩类孔隙潜水含水层系统主要分布于山前至冲洪积扇中部区域,又可将其细分为浅层潜水带和深层潜水带,浅层潜水带埋深小于50 m,含水层主要由中砂、粉砂构成,水化学类型主要以Cl–Na和$Cl\cdot SO_4$–Na·Ca型为主,TDS小于1 $g\cdot L^{-1}$,深层潜水带埋深大于50 m,含水层主要由砂卵砾石构成,富水性强,水化学类型以$Cl\cdot HCO_3$–Na·Ca和$HCO_3\cdot Cl$–Na为主,TDS小于1 $g\cdot L^{-1}$。第四系松散岩类多层孔隙承压自流水含水层系统主要分布于冲积扇前缘和平原区域,含水层介质垂向差异较大,自冲洪积扇前缘至平原,含水层岩性由粗变细,隔水层厚度逐渐增加,水头上升,浅埋深含水层岩性主要由粗中砂和粉细砂构成,含水层厚度为10~50 m,TDS小于1 $g\cdot L^{-1}$,深部含水层岩性由含砾中粗砂构成,含水层厚度大于15 m,分布于近平原区域的地下水TDS达15 $g\cdot L^{-1}$。

2 样品采集和测试分析

2.1 样品采集

2023年5月在那河流域开展样品采集工作,取样点位置如图1所示,共采集样品46组,包括:河水样品14组(楚拉克阿拉干河1组,洪水河1组,那棱格勒河12组)、地下水样品14组(那棱格勒河上游2组,一级冲积扇12组)、湖表卤水样品7组(东台吉乃尔湖3组、鸭湖4组),晶间卤水11组(一里坪7组、西台吉乃尔湖4组)。此外,查阅文献搜集那河流域大气降水氢氧同位素数据17组[22]。

所有样品均使用容积为250 mL聚乙烯瓶采集,采集前用待采样品润洗聚乙烯瓶三遍,采集时使用0.45 μm醋酸纤维膜过滤且确保瓶内无气泡,采集后将样品低温、密封保存。采集过程中为确保测试数据准确、可靠,地下水样品均采集于不易受外界环境因素干扰的潜水和承压水含水层,地下水样品采集前为消除井筒内滞留水污染样品,需抽水30 min保证待采水体物化参数稳定后再开展样品采集工作,河水、湖表卤水样品均采集于距岸边5 m处。

2.2 测试分析

样品测试分为现场测试和室内测试。现场测试内容为不同水体pH值、水温(℃)和溶解性总固体(TDS, $mg\cdot L^{-1}$),使用便携式参数仪开展测试:SX-620型笔式pH计(±0.01 pH,±0.1 ℃)、SX-650型笔式TDS计(±1.0%FS)。室内测试内容为不同水体氢氧同位素(δD和$\delta^{18}O$),室内测试工作均由中国科学院青海盐湖研究所完成,测试仪器为液态水同位素分析仪(LGR-LWIA–24d),测试精度为0.28‰(δD)和0.03‰($\delta^{18}O$)。基于维也纳标准平均海水(VSMOW)千分偏差值‰表示待测样品氢氧同位素:

$$\delta_{样品}=(R_{样品}/R_{标准}-1)\times 1000$$

式中:$R_{样品}$与$R_{标准}$分别表示样品与标准样品中重同位素与轻同位素比值。测试结果$\delta_{样品}$大于0,表明测试样品中重同位素比标准样品中更富集,反之,则表明标准样品中重同位素比测试样品中更富集。为确保测试结果真实、可靠,所有样品均复测三遍。

3 结果与分析

3.1 不同水体氢氧同位素组成特征及其指示意义

那河流域大气降水[22]、河水、地下水、湖表卤水和晶间卤水氢氧同位素和氘盈余如表1和图2所示。

3.1.1 大气降水δD和$\delta^{18}O$特征 探究区域大气降水氢氧同位素特征,对于识别区域水体补给源、揭示水循环演化机制具有重要意义。研究区大气降水δD值变化范围为–105.30‰~6.10‰,平均值为–40.16‰,$\delta^{18}O$变化范围为–14.80‰~–1.10‰,平均值为–6.10‰,我国大气降水δD值变化范围为–190‰~20‰,平均值为–54.82‰,$\delta^{18}O$变化范围为–24‰~2.0‰,平均值为–7.95‰[23],研究区大气降水氢氧同位素平均值均

表1 那河流域δD、$\delta^{18}O$和*d*-excess统计

Tab. 1 The value of δD、$\delta^{18}O$ and *d*-excess in the Nalenggele River

样品类型	数值	δD/‰	$\delta^{18}O$/‰	*d*-excess
大气降水	最大值	−6.10	−1.10	25.70
	最小值	−105.30	−14.80	−5.10
	平均值	−40.16	−6.10	8.64
河水	最大值	−52.00	−6.78	14.84
	最小值	−66.30	−9.66	2.22
	平均值	−58.10	−8.50	9.60
地下水	最大值	−50.90	−8.20	14.70
	最小值	−64.10	−9.23	9.79
	平均值	−58.00	−8.80	12.70
湖表卤水	最大值	−13.00	−0.08	−1.31
	最小值	−51.70	−6.62	−14.54
	平均值	−22.40	−1.40	−11.30
晶间卤水	最大值	45.70	7.70	−7.04
	最小值	7.40	1.81	−33.78
	平均值	27.00	6.40	−23.90

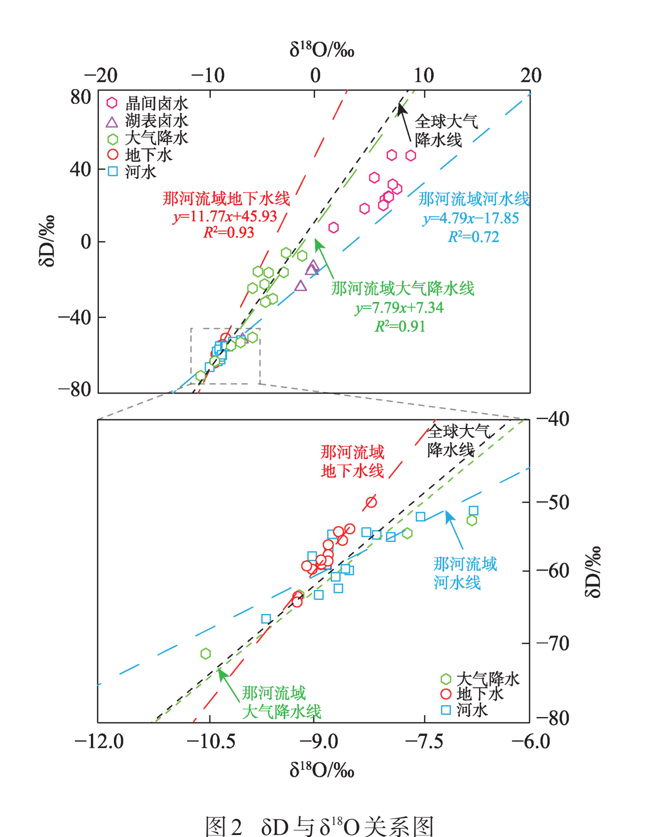


图2 δD与$\delta^{18}O$关系图

Fig. 2 The relationship between δD and $\delta^{18}O$

大于我国大气降水的平均值，这与研究区高寒干旱气候特征密切相关，大气降水在下落过程中受蒸发和水汽再循环影响导致氢氧同位素更加富集。

由于不同区域地理位置、海拔高度和气候特征等存在较大差异，基于当地大气降水氢氧同位素数据可获取当地大气降水线，那河流域大气降水线方程为：$\delta D=7.76\delta^{18}O+7.23$，斜率为7.76(图2)。全球大气降水线方程为：$\delta D=8\delta^{18}O+8$，斜率为8(图2)，那河流域大气降水线位于全球大气降水线右下方，其斜率略小于全球大气降水线斜率，表明大气降水下降过程中受到强烈蒸发作用影响，符合典型内陆干旱区大气降水氢氧同位素特征。此外，前人针对西北内陆干旱区大气降水同位素特征开展了较为深入的研究，总结多条西北内陆干旱区大气降水线，其斜率变化范围为7.05~7.38[23-25]，均小于那河大气降水线斜率，其原因可能是研究区存在大气降水蒸发再循环现象，大气降水蒸发冷凝后再次形成降雨时，氢氧同位素会沿着斜率为8的冷凝线分布。

3.1.2 河水δD和$\delta^{18}O$特征 那河河水δD值变化范围为−66.30‰~−52.00‰，平均值为−58.10‰，$\delta^{18}O$变化范围为−9.66‰~−6.78‰，平均值为−8.50‰。应用最小二乘法构建河水δD和$\delta^{18}O$线性回归方程并将其定义为河水线(RWL)，对比分析河水线与全球大气降水线可以判断河水补给来源及蒸发强度。那河河水线为$\delta D=4.69\delta^{18}O-18.5$，河水线斜率和截距均小于全球大气降水线(图2)，表明河水自上游至下游均经历蒸发作用。前人研究表明，对于经历强烈蒸发作用的水体而言，水体中氘盈余与$\delta^{18}O$呈现较好的负相关关系，图3为那河流域河水样品$\delta^{18}O$与氘盈余关系图，可以发现二者呈现较好的负相关关系，也佐证了河水自山区流至盆地内部平原区经历强烈蒸发作用。

对于单一流域而言，仅受蒸发作用影响下的河

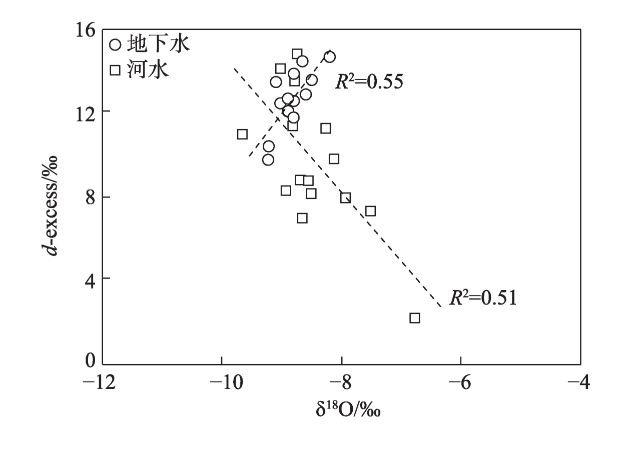


图3 $\delta^{18}O$与*d*-excess关系

Fig. 3 The relationship between $\delta^{18}O$ and *d*-excess

水 $\delta^{18}O$ 值自上游至下游逐渐递增,下游河水重同位素比上游河水更富集。如图4所示,河流沿程的河水 $\delta^{18}O$ 值并未呈现逐渐增加的变化趋势,表明河水除了受蒸发作用影响外,还受其他来源水体混入、地下水-地表水相互作用等影响。在山区,河水 $\delta^{18}O$ 相对贫化,沿河流流向呈现逐渐增加趋势;自一级冲积扇顶端至中部区段,河水 $\delta^{18}O$ 值突然减小,与地下水 $\delta^{18}O$ 值较为接近,可能是地下水-地表水相互转换所致[23-24];自一级冲积扇中部至一级冲积扇扇缘区段,在蒸发作用影响下,河水 $\delta^{18}O$ 沿程呈现逐渐富集趋势。在蒸发作用、地下水与河水相互作用叠加影响下,那河流域河水稳定同位素沿流向呈现"增加-减少-增加"的动态变化趋势,具有西北典型干旱区内陆河流稳定同位素特征[25-26]。

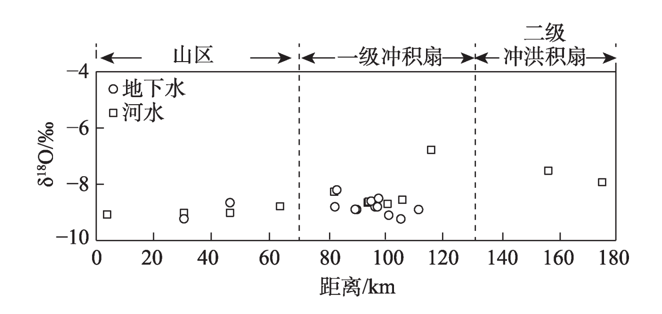


图4　河水、地下水 $\delta^{18}O$ 沿程变化

Fig. 4　The variation of $\delta^{18}O$ value along the Nalenggele River

3.1.3　地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征　那河流域地下水 δD 值变化范围为-64.10‰~-50.90‰,平均值为-58.00‰,$\delta^{18}O$ 变化范围为-9.23‰~-8.20‰,平均值为-8.80‰。基于地下水氢氧同位素特征,可以识别地下水补给来源、揭示地下水和地表水相互作用关系。那河流域地下水线位:$\delta D=11.77\delta^{18}O+45.93$,与全球大气降水线和当地大气降水线相比,那河流域地下水线的斜率和截距均偏大(图2)。一般而言,地下水氢氧同位素位于全球大气降水线上方区域较为少见,分析其原因可归纳为以下两方面:(1) 那河发源于昆仑山东部布喀达坂地区,源头区域属于高海拔高寒山区,流域内地下水除接受大气降水补给外,源头区域的冰川融水也是流域地下水的重要补给来源。(2) 与那河流域不同区段复杂的地下水与地表水转换关系密切相关,如图2所示,部分河水样品与地下水样品落在同一区域内,且均位于全球大气降水线上方区域,表明河水也是地下水的补给来源之一。

基于地下水与河水氢氧同位素差异,可以判断二者间补给、排泄关系,当地下水氢氧同位素值大于河水时,表明该河段以河水补给地下水为主,当地下水氢氧同位素值小于河水时,则表明该河段以地下水补给河水为主[1,11,27]。根据河流沿程分析河水、地下水氢氧同位素变化特征(图4),在山区的上游河段,河水氧同位素值大于地下水,说明该区段以地下水补给河水为主;在近出山口至一级冲积扇中部区段,地下水氢氧同位素值大于河水,表明该区段以河水补给地下水为主;在一级冲洪积扇中部至一级冲积扇扇缘河段,河水氢氧同位素大于地下水,表明该区段以地下水补给河水为主;由于二级冲洪积扇未取得地下水样品,故无法分析二级冲积扇河水与地下水补给、排泄关系。

3.1.4　湖表卤水和晶间卤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征　那河尾闾盐湖湖表卤水 δD 值变化范围为-51.70‰~-13.00‰,平均值为-22.40‰,$\delta^{18}O$ 变化范围为-6.62‰~-0.08‰,平均值为-1.40‰;那河尾闾盐湖晶间卤水 δD 值变化范围为7.40‰~45.70‰,平均值为27.00‰,$\delta^{18}O$ 变化范围为1.81‰~7.70‰,平均值为6.40‰。与河水、地下水氢氧同位素数值相比,湖表卤水和晶间卤水氢氧同位素数值分布较为接近(图2),表明二者经历相似水文地球化学过程,具有同源性。研究区湖表卤水和晶间卤水氢氧同位素值较高,均分布于当地大气降水线和全球大气降水线右上方区域(图2),表明二者均发生了显著的"氧漂移"现象。鸭湖和东台吉乃尔湖是那河的尾闾湖泊,那河是其主要补给源,两个湖泊的面积较大且水深较浅,强烈的蒸发作用导致湖表卤水氢氧同位素过度分馏,水体中 δD 和 $\delta^{18}O$ 较富集。

3.2　不同水体补给来源

3.2.1　河水和地下水补给来源　研究区大气降水氢氧同位素分布于河水、地下水右上方区域,表明大气降水重同位素比河水和地下水更加富集(表1和图2)。如果当地大气降水是河水和地下水的补给来源,雨水下落过程受蒸发作用影响,河水和地下水中重同位素应比大气降水更富集,但实际情况却与该过程相反,表明当地大气降水并不是河水和地下水的直接补给来源。此外,河水和地下水氢氧同位素未沿那河流域大气降水线分布,结合研究区气候特征分析,该区域年平均降雨量小于50 mm,而年平均蒸发量大于2000 mm,也可以佐证当地大气降

水不是河水和地下水的主要补给来源。

前人基于研究区南部昆仑山区不同海拔高度降雨数据构建两条大气降水线，海拔3550 m大气降水线 $\delta D=7.4\delta^{18}O+13.2$ 和海拔4700 m大气降水线 $\delta D=8.5\delta^{18}O+18.39$。由图5可知，研究区河水和地下水样品均位于海拔3550 m大气降水线下方区域且主要沿海拔4700 m大气降水线分布，表明研究区南部山区大气降水是那河流域地下水的主要补给来源。

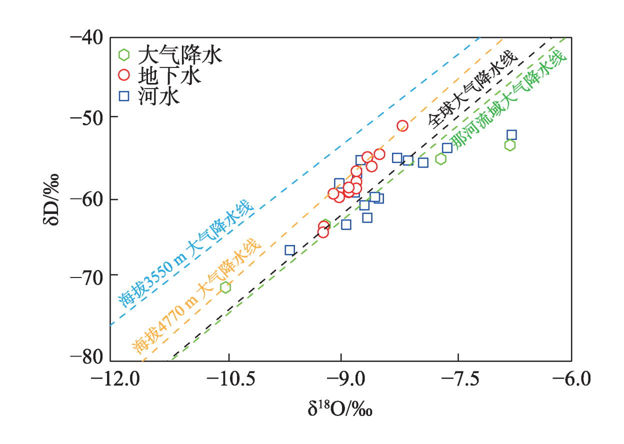


图5 河水、地下水的δD、δ18O与不同大气降水线

Fig. 5 The relationship between meteoric water line and the δD and δ18O value in river and groundwater

3.2.2 湖表卤水和晶间卤水补给来源 氢氧同位素结果表明湖表卤水和晶间卤水接受河水、地下水和山区大气降水补给，但由于氢氧稳定同位素结果具有多解性，进一步利用硼同位素开展溯源研究。$\delta^{10}B$ 和 $\delta^{11}B$ 是硼的两种稳定同位素，水岩作用促使质量较轻的 $\delta^{10}B$ 同位素易吸附于黏土矿物，造成水体中 $\delta^{11}B$ 富集，故水岩作用程度不同的水体中 $\delta^{11}B$ 值也呈现显著差异[28-30]，因此，硼同位素常被应用于盐湖溯源识别研究[31]。

河水中硼元素含量极低，在快速流动中与黏土矿物发生水岩作用较弱，$\delta^{11}B$ 分馏作用较小，故河水呈现低 $\delta^{11}B$ 特征[32]。地下水流动过程可溶解黏土层中的硼，但是黏土吸附态的硼大多数呈现低 $\delta^{11}B$ 特征，故地下水也呈现低 $\delta^{11}B$ 特征[33]。如图6所示，那河流域河水和地下水 $\delta^{11}B$ 较低。在河水和地下水补给作用影响下，湖表卤水和晶间卤水 $\delta^{11}B$ 值应处于低值特征，但测试结果表明湖表卤水和晶间卤水 $\delta^{11}B$ 较高，因此，除上述两个补给来源外，湖表卤水和晶间卤水还存在其他补给来源。

前人研究结果表明深部卤水具有高 $\delta^{11}B$ 特征[34-35]，将其视为高值端元，呈现低 $\delta^{11}B$ 特征的河水和地下水视为低值端元，那河尾闾盐湖的湖表卤水和晶间卤水 $\delta^{11}B$ 介于两个端元之间，表明盐湖和晶间卤水可能还接受深部古卤水补给。从地质构造上来看，那河尾闾盐湖位于柴达木盆地不整合断裂带沿线，且沿断裂带分布有一系列串状盐湖，断裂带为深部卤水上涌补给盐湖提供了补给路径[34-35]，因此，除接受河水和地下水补给外，盐湖和晶间卤水还接受深部卤水补给。

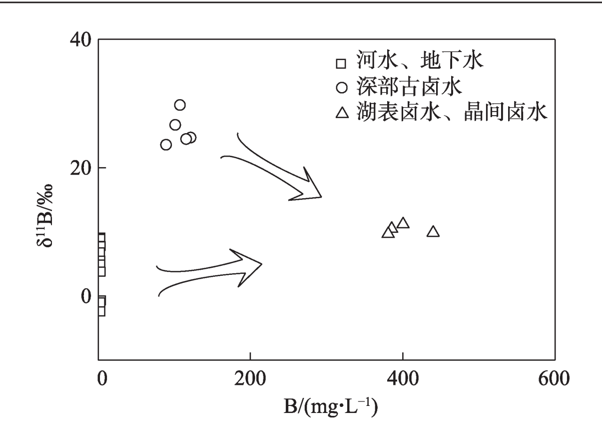


图6 不同水体B和δ11B关系图

Fig. 6 The relationship between B and δ11B of different water

3.3 氘盈余特征及其指示意义

氘盈余 d-excess=$\delta D-8\delta^{18}O$，其数值大小与水体所经历的水文循环过程密切相关。那河流域不同水体氘盈余值如表1所示。大气降水氘盈余值为−5.10‰~25.70‰，平均值为8.64‰；那河河水氘盈余值为2.22‰~14.84‰，平均值为9.60‰；那河流域地下水氘盈余值为9.79‰~14.70，平均值为12.70‰；那河尾闾盐湖的湖表卤水氘盈余值为−14.54‰~1.31‰，平均值为−11.30‰；那河尾闾盐湖的晶间卤水氘盈余值为−33.78‰~−7.04‰，平均值为−23.90‰。

大气降水氘盈余值可反映区域内降雨蒸发和同位素分馏强度，来源于内陆高寒干旱区的大气降水 d-excess 值大于10‰，而来源于滨海地区的大气降水 d-excess 小于10‰[23-24]。本研究中大气降水样品收集于5—8月，超过半数样品 d-excess 值大于10‰，表明该时间段内大气降水多来源于水汽蒸发形成的降雨，而小于10‰的样品多采集于8月份，饶文波等[35]应用HYSPLIT后向轨迹模拟发现该区域8月份水汽来源于东西南北多个方向，表明水汽来源具有复杂性特征，虽然东亚夏季风输送至研究区的距离较远，但仍是导致该区域8月份大气降水

d-excess值偏低的重要因素[35]。水体蒸发主导的水汽再循环是典型高寒干旱区水文循环的重要组成,该类地区河水蒸发产生的水汽被输送至上游高海拔高寒地区形成降雨,这些地区降雨氢氧同位素常分布于当地大气降水线和全球大气降水线上方[23],此外,与外来水汽形成降雨的氘盈余相比,水汽再循环形成降雨的氘盈余较高[24]。如表1和图2所示,那河流域部分大气降雨样品氢氧同位素位于全球大气降水线上方且氘盈余值较大,表明那河流域受当地水汽再循环的影响。

河水氘盈余值可表征水体环境特征,水体经历蒸发作用会导致同位素分馏,造成氘盈余值偏小,氘盈余值越小表明蒸发作用越强烈。如图7所示,河水氘盈余值随TDS增加而减小,这与该地区气候特征密切相关,研究区降雨稀少而蒸发强烈,沿径流方向河水受蒸发作用影响逐渐增强,同位素分馏现象愈发显著,导致河水氧同位素逐渐富集,氘盈余值减小。

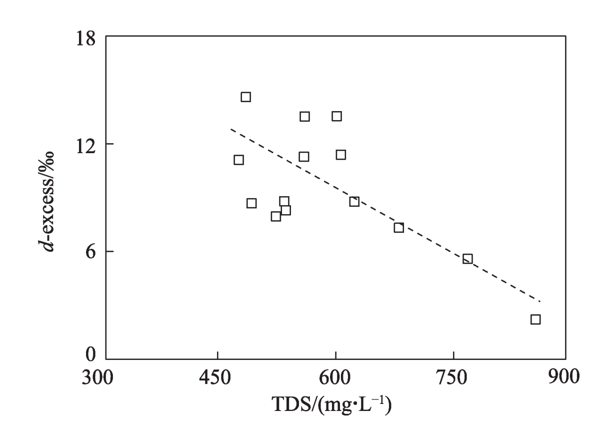


图7　河水TDS与*d*-excess关系图

Fig. 7　The relationship between TDS and *d*-excess in river

湖表卤水和晶间卤水氘盈余值均小于0,表明二者均经历强烈蒸发作用,那河流域降雨稀少且蒸发强烈,湖水表明易受到蒸发和二次蒸发作用影响,导致湖水氘盈余值偏小,晶间卤水氘盈余值小于湖表卤水,可能与晶间卤水除经历蒸发作用外还受盐类矿物溶滤作用影响有关。

3.4　氢氧同位素高程效应

大气降水氢氧同位素存在较强的大陆效应和高程效应。当含水气团自滨海地区向内陆移动时,气团内部凝结降水导致同位素分馏,大气降水中的δD和δ^{18}O随着远离滨海地区的距离增加而逐渐降低。当海拔高度增加时,气候特征改变影响同位素分馏,进而导致大气降水中δD和δ^{18}O变化。大气降水作为不同水体的主要补给来源,也会影响其氢氧同位素特征。

研究区湖表卤水和晶间卤水取样点经纬度、海拔高程较为接近,未呈现大陆效应和高程效应,河水氢氧同位素也未呈现大陆效应。河水氢氧同位素与海拔高程关系如图8所示,河水δD、δ^{18}O与海拔高度(E)呈现较好的相关性:$\delta D=-0.0041E-45.82$,$\delta^{18}O=-0.0012E-4.80$,研究区海拔高度每增加100 m,δD减少1.96‰,δ^{18}O减少0.31‰。因此,高程效应是导致河水氢氧同位素差异的主控因素,其原因主要包含两方面:一方面,当海拔高度增加至3000 m时,气温迅速下降导致大气中水汽易凝结形成降雨,不同海拔高度的雨水δD、δ^{18}O产生区域性富集和贫化[23],降雨是河水的主要补给来源,故导致河水δD、δ^{18}O随海拔高度改变而变化;另一方面,高海拔地区易形成小范围气候特征,当某区域海拔增加时,该区域内气温、水温、蒸发量以及河流水岩作用等均发生较大变化,进而导致河水氢氧同位素特征变化。

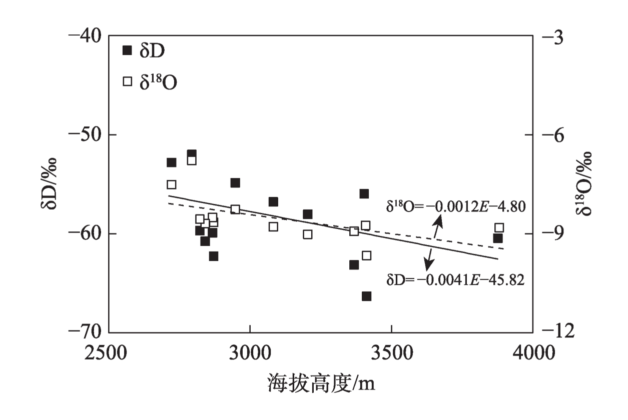


图8　河水δD、δ^{18}O与海拔高度关系图

Fig. 8　The relationship between elevation and the δD、δ^{18}O value of river water

4　结论

通过对那棱格勒河流域不同水体开展氢氧同位素和氘盈余参数特征及影响因素分析,得出以下结论:

(1) 研究区大气降水氢氧同位素平均值大于我国大气降水的平均值,这与该区域高寒干旱气候特征密切相关,大气降水在下落过程中受强烈蒸发作

用影响导致氢氧同位素更加富集。那河流域大气降水线的斜率略小于全球大气降水线且大于西北干旱区其他流域大气降水线，同时，那河流域大气降雨氢氧同位素位于全球大气降水线上方且氘盈余值较大，其原因是研究区存在大气降水蒸发再循环现象，导致蒸发再循环后形成降雨的氢氧同位素沿斜率为8的冷凝线分布。氘盈余参数特征也表明研究区大气降水的水汽来源具有复杂性特征，东亚季风远距离输送是导致研究区8月份大气降水氘盈余参数偏低的重要因素。

（2）构建那河流域河水线：$\delta D=4.69\delta^{18}O-18.5$，河水线斜率和截距均小于全球大气降水线，且河水氘盈余参数与$\delta^{18}O$、TDS均呈负相关关系，表明河水自山区流至盆地内部平原区时蒸发作用导致同位素分馏愈发显著，造成河水稳定同位素逐渐富集，氘盈余值减小。分析河水$\delta^{18}O$值沿程变化，在蒸发作用、地下水与河水相互作用叠加影响下，河水稳定同位素沿程呈现“增加-减少-增加”的变化趋势，具有典型干旱区内陆河流稳定同位素特征。南部山区降雨是河水的主要补给来源，高程效应是导致河水氢氧同位素产生差异的主要因素。

（3）建立那河流域地下水线：$\delta D=11.77\delta^{18}O+45.93$，地下水线截距和斜率均大于全球大气降水线和当地大气降水线，其原因与其接受多源补给、那河流域地下水与河水相互转化作用密切相关。沿程分析地下水与河水补、排关系，在山区上游和一级冲洪积扇中部至一级冲积扇扇缘河段，以地下水补给河水为主，在近出山口至一级冲积扇中部区段，以河水补给地下水为主。地下水氢氧同位素沿海拔4700 m大气降水线分布，表明研究区南部山区降雨是地下水的主要补给来源。

（4）湖表卤水和晶间卤水氢氧同位素分布较为接近，表明二者具有同源性，经历了相似的水文地球化学过程。尾闾盐湖面积较大且水深较浅，强烈的蒸发作用导致同位素过度分馏，造成湖表卤水和晶间卤水均发生“氧漂移”现象且二者的氘盈余参数值较小。蒸发作用和盐类矿物溶滤作用叠加是导致晶间卤水氘盈余参数小于湖表卤水的主要因素。硼同位素分析结果表明湖表卤水和晶间卤水除接受河水、地下水和山区大气降水补给外，还接受深部卤水补给。

致 谢 感谢河北省地质环境监测院刘素英、张顺涛对本研究工作的大力支持！

参考文献（References）：

[1] 曾帝, 吴锦奎, 李洪源, 等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 857–869. [Zeng Di, Wu Jinkui, Li Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: A review[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 857–869.]

[2] 杨晨曦, 李云霞, 李嘉燕, 等. 湘东北地区大气降水和地下水的氢氧稳定同位素研究[J]. 地球环境学报, 2024, 15(2): 326–341. [Yang Chenxi, Li Yunxia, Li Jiayan, et al. Variation of stable hydrogen and oxygen isotopes in precipitation and groundwater in northeast Hunan[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(2): 326–341.]

[3] 李晗薇, 姚俊强, 容韬, 等. 塔什库尔干河流域河谷大气降水同位素特征与水汽输送路径[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 399–410. [Li Hanwei, Yao Junqiang, Rong Tao, et al. Characteristics of atmospheric precipitation isotope and path analysis of water vapor transport in the Taxkorgan River Basin Valley[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 399–410.]

[4] Surma J, Assonov S, Bolourchi M J, et al. Triple oxygen isotope signatures in evaporated water bodies from the Sistan Oasis, Iran[J]. Geophysics Research Letter, 2015, 42(20): 8456–8462.

[5] 王雅璇, 肖蓓, 崔步礼, 等. 百脉泉泉群泉水氢氧稳定同位素时空变化特征[J]. 地球环境学报, 2024, 15(1): 69–77. [Wang Yaxuan, Xiao Bei, Cui Buli, et al. The spatiotemporal characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of Baimai Spring Group[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(1): 69–77.]

[6] 雍亮, 冯民权. 长河流域δD、$\delta^{18}O$特征及水体补给关系[J]. 水文, 2023, 43(6): 79–85. [Yong Liang, Feng Minquan. Characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in Changhe River Basin and their recharge relationships[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(6): 79–85.]

[7] Gonfiantini R, Wassenaar L I, Araguas L, et al. A unified Craig-Gordon isotope model of stable hydrogen and oxygen isotope fractionation during fresh or saltwater evaporation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 235: 224–236.

[8] 赵祥宇, 陈菁, 王收, 等. 氢氧同位素组成对丰沛平原区水循环的指示意义[J]. 地球与环境, 2024, 52(1): 86–95. [Zhao Xiangyu, Chen Qing, Wang Shou, et al. Indicative significance of hydrogen and oxygen isotopic composition of water bodies in the Fengpei Plain to water cycle and evaporation[J]. Earth and Environment, 2024, 52(1): 86–95.]

[9] 刘鑫, 向伟, 司炳成. 汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1739–1749. [Liu Xin, Xiang Wei, Si Bingcheng. Hydrochemical and isotopic characteristics in the shallow groundwater of the Fenhe River Basin and indicative significance[J]. Environmental Science,

2021, 42(4): 1739-1749.]

[10] 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4440-4448. [Zhao Chunhong, Shen Haoyong, Wang Zhiheng, et al. Hydrochemica and isotopic characteristic in the surface water of the Fenhe River basin and influence factors[J]. Environmental Science, 2022, 43 (10): 4440-4448.]

[11] 苏绘梦, 张发旺, 侯甦予, 等. 基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区地下水循环变化解析[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 53-67. [Su Huimeng, Zhang Fawang, Hou Suyu, et al. An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 53-67.]

[12] Xiao Y, Liu K, Zhang Y Q, et al. Numerical investigation of groundwater flow systems and their evolution due to climate change in the arid Golmud river watershed on the Tibetan Plateau [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 943075.

[13] Wang D, Han G L, Hu M M, et al. Evaporation processes in the upper river water of Three Gorges Reservoir: Evidence from triple oxygen isotopes[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2021, 5(10): 2807-2816.

[14] 徐忠宝, 杨丽萍, 翁白莎, 等. 青藏高原不同水体氢氧稳定同位素特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 521-533. [Xu Zhongbao, Yang Liping, Weng Baisha, et al. Stable isotopic characteristics of hydrogen and oxygen in different water bodies in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 521-533.]

[15] Luz B, Barkan E. Variations of $^{17}O/^{16}O$ and $^{18}O/^{16}O$ in meteoric waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(22), 6276-6286.

[16] 韩积斌, 张海云, 张宝云. 柴达木盆地那棱格勒河冲积扇浅层地下水的脆弱性评价[J]. 盐湖研究, 2023, 31(3): 10-17. [Han Jibin, Zhang Haiyun, Zhang Baoyun. Volnerability assessment of shallow groundwater of Nalenggele alluvial fan, Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(3): 10-17.]

[17] 李庆宽. 多指标约束下的那棱格勒河流域及其尾闾盐湖锂的物源与迁移富集规律研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020. [Li Qingkuan. Multi-index Study on the Source, Migration and Enrichment of Lithium in the Nalenggele River Drainage and Terminal Lakes[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.]

[18] 徐威. 那棱格勒河冲洪积平原地下水循环模式及其对人类活动的响应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. [Xu Wei. Groundwater Cycle Patterns and Its Response to Human Activities in Nalenggele Alluvial-Proluvial Plain[D]. Changchun: Jilin University, 2015.]

[19] 谭红兵, 陆是成, 拓万全, 等. 柴达木盆地那棱格勒河流域的水资源与矿源意义[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 392-397. [Tan Hongbing, Lu Shicheng, Tuo Wanquan, et al. Water resource and mineral source significances of Nalenggele River Catchment in Qaidam Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 392-397.]

[20] 刘兆峰, 王建萍, 韩进军, 等. 基于SWAT模型的那棱格勒河流域径流模拟及水量平衡分析[J]. 盐湖研究, 2024, 32(1): 48-56. [Liu Zhaofeng, Wang Jianping, Han Jinjun, et al. Runoff simulation and water balance analysis in the Nalenggele River Basin using the SWAT Model[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32 (1): 48-56.]

[21] 李庆宽, 王建萍, 吴蝉, 等. 柴达木盆地那棱格勒河及其尾闾盐湖锂成矿物源: 来自水化学和锶、硫同位素证据[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2169-2182. [Li Qingkuan, Wang Jianping, Wu Chan, et al. Hydrochemistry and Sr-S isotope constraints on the source of lithium in the Nalenggele River and its terminal lakes, Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2169-2182.]

[22] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2784-2790. [Zhu Jianjia, Chen Hui, Gong Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2784-2790.]

[23] 杨暖. 柴达木盆地东部地下水稳定同位素组成特征及其对水汽来源与气候变化的指示[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. [Yang Nuan. Characteristics of Groundwater Stable Isotopic Compositions in Eastern Qaidam Basin: Implications for Moisture Sources and Climate Change[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.]

[24] 肖勇. 柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [Xiao Yong. Groundwater Circulation Patternsand Itschange Trendin Southern Qaidam basin, Northwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]

[25] 王兵, 秦西伟, 任二峰, 等. 柴北缘大柴旦地区地下热水成因: 来自水化学及氢、氧、锶同位素的约束[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2024, 43(1): 167-177. [Wang Bing, Qin Xiwei, Ren Erfeng, et al. Gensis of geothermal water in the Da Qaidam area, northern margin of the Qaidam Basin: Constraints from hydrochemistry and isotopes of hydrogen-oxygen-strontium[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2024, 43(1): 167-177.]

[26] 何启欣, 曹广超, 曹生奎, 等. 香日德-柴达木河流域水体氢氧稳定同位素特征及影响因素研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 820-828. [He Qixin, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Hydrogen-oxygen isotope characteristics of water bodies in the Xiangride-Qaidam River Basin and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 820-828.]

[27] 党岩. 柴达木盆地塔塔凌河流域地下水循环演化模式[D]. 西安: 长安大学, 2020. [Dang Yan. The Model of Evolution and Cir-

culation of Groundwater in the Tataling River Basin, Qaidam Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.]

[28] 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 等. 南小河沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 682-690. [Guo Yawen, Tian Fuqiang, Hu Hongchang, et al. Characteristics and significance of stable isotopes and hydrochemistry in surface water and groundwater in Nanxiaohegou Basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 682-690.]

[29] 王淑丽, 郑绵平, 王永明, 等. 中国盐湖地球化学发展历程与研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 1-9. [Wang Shuli, Zheng Mianping, Wang Yongming, et al. Advances and development history of geochemistry on salt lakes in China[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 1-9.]

[30] 祁海平, 王蕴慧, 肖应凯, 等. 中国盐湖中硼同位素的初步研究[J]. 科学通报, 1993, 19(7): 634-637. [Qi Haiping, Wang Yunhui, Xiaoy Yingkai, et al. The preliminary study on boron isotopes in the salt lakes of China[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 19(7): 634-637.]

[31] 李建森. 柴达木盆地卤水型 K、B、Li 资源富集和成矿机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022. [Li Jiansen. Enrichment and Metallogenic Mechanism of the Brine-type K, B, Li Resources in the Qaidam Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.]

[32] 李建森, 李廷伟, 马云麒, 等. 柴达木盆地卤水型Li、Rb关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(3): 474-485. [Li Jiansen, Li Tingwei, Ma Yunqi, et al. Distribution and origin of brine-type Li-Rb mineralization in the Qaidam Basin, NW China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(3): 474-485.]

[33] 卢鋆, 潘彤, 李永寿, 等. 柴达木盆地中部一里坪-西台吉乃尔地区深层卤水水化学特征及成因初探[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2129-2137. [Lu Jun, Pan Tong, Li Yongshou, et al. A preliminary investigation of hydrochemical characteristic and genesis of deep brine in the central Qaidam basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2129-2137.]

[34] Wei H Z, Jiang S Y, Tan H B, et al. Boron isotope geochemistry of salt sediments from the Dongtai salt lake in Qaidam Basin: Boron budget and sources[J]. Chemical Geology, 2014, 380: 74-83.

[35] 饶文波, 李垚炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源:以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. [Rao Wenbo, Li Yaowei, Tan Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: A case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125.]

Hydrogen and oxygen isotopic characteristics and indicative significance in the Nalenggele River

ZHANG Shouchuan[1], ZHAO Chuntao[2,3], AN Yatao[4], LIU Kai[1], YU Dongmei[2,3], CHEN Liang[2,3], LI Qingkuan[2,3], WANG Jianping[2,3]

(1. Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 4. The Second Geological Team of Hebei Coal Field Geology Bureau (Hebei Province Dry Hot Rock Research Center), Xingtai 054001, Hebei, China)

Abstract: In this study, 63 samples comprising atmospheric precipitation, river water, groundwater, lake surface brine, and intercrystaline bittern were collected from the Nalenggele River. These samples were analyzed to assess the distribution characteristics and influencing factors of hydrogen and oxygen isotope, as well as deuterium surplus. The key findings are as follows: (1) The δD and $\delta^{18}O$ values of atmospheric precipitation in the study area are higher than the average values across China. Due to the combined effect of evaporation and water vapor recirculation, the slope of the meteoric water line in the study area is lower than the global meteoric water line but higher than that of other drainage basins in the northwest arid zone. The East Asian monsoon, which transports water vapor over long distances, is the primary factor contributing to the low deuterium surplus in the atmospheric precipitation of the study area in August. (2) The river water line slope in the study area is smaller than that of the global meteoric water line. The deuterium surplus in river water is negatively correlated with $\delta^{18}O$ and TDS (Total dissolved solids), which is attributed to isotopic fractionation caused by evaporation. The river is primarily recharged by atmospheric precipitation from southern mountainous areas. Variations in isotopic elevation effects result in differences in δD and $\delta^{18}O$ values across different sections of the Nalenggele River. (3) Groundwater-surface water interactions, along with the groundwater recharge from multiple sources in the southern mountainous areas, cause the slope and intercept of the groundwater lines to be larger than those of both the global and local meteoric water lines. (4) The hydrogen and oxygen isotopes of surface brine and intercrystaline brine show an “oxygen drift” phenomenon, with deuterium surplus values falling below zero. This is attributed to excessive fractionation induced by evaporation. The deuterium surplus value in intercrystaline is lower than that of surface brine, likely due to the dissolution and filtration of salt minerals.

Keywords: hydrogen and oxygen isotopes; deuterium surplus; arid watershed; Nalenggele River